

成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

評価資料として利用いたしますので、様式・順序は任意ですが、学術論文については題名、著者、発行年月、雑誌名、巻、ページが記載されていること。

< 査読つき論文雑誌 >

1. K.Nakazato, K.Sumiyoshi & S.Yamada;
“Gravitational Collapse and Neutrino Emission of Population III Massive Stars”
Astrophysical Journal (2006) in press.

< 国際会議 >

2. K.Nakazato, K.Sumiyoshi & S.Yamada;
“Gravitational Collapse and Neutrino Emission of Population III Massive Stars”
Relativistic Astrophysics and Cosmology - Einstein's Legacy -
(口頭発表、2005年11月、ドイツ・ミュンヘン)
1. K.Nakazato, K.Sumiyoshi & S.Yamada;
“Gravitational Collapse and Neutrino Emission of Population III Massive Stars”
The Third 21COE Symposium : Astrophysics as Interdisciplinary Science
(ポスター発表、2005年9月、早稲田大学)

< 国内研究会 >

1. 中里健一郎，住吉光介，山田章一；
“ Pop III 大質量星の重力崩壊と Relic Neutrino ”
2005年度第18回理論懇シンポジウム「高エネルギー天体物理学の最前線」
(ポスター発表、2005年12月、京都大学基礎物理学研究所)

< 国内学会 >

3. 中里健一郎，住吉光介，山田章一；
“ 鉄コアの重力崩壊における質量依存性 ”
日本天文学会，和歌山大学，2006年3月（口頭発表、投稿中）
2. 中里健一郎，住吉光介，山田章一；
“ Pop III 大質量星の重力崩壊に伴うニュートリノ放出 ”
日本天文学会，札幌コンベンションセンター，2005年10月（口頭発表）
1. 中里健一郎，住吉光介，山田章一；
“ ニュートリノ輸送を考慮した Pop III 大質量星の重力崩壊 ”
日本天文学会，明星大学，2005年3月（口頭発表）

成果の概要

(必要に応じてページを加えて下さい。)

宇宙が生まれた後、一番最初に出来たと考えられる Population III (Pop III) star に関する研究は、それ以降の宇宙の化学進化、ひいては宇宙全体の歴史を理解する上で避けて通れない問題である。これらの星に関する研究は、最近、WMAP や金属欠乏星の観測により、間接的にはあるが、さまざまなことがわかり始めている。一方、理論的には、Pop III star には、太陽質量の数 100 ~ 1000 倍程度のものが多くあった可能性が指摘され、これらの星は質量放出をすることなくほとんどそのままの質量で進化し、最後は重力崩壊を起こして Pair Instability Supernova になるかブラックホールになる、とされている。しかし、Initial Mass Function (IMF) や星形成率については、大きな不確定性が残っている。

本研究課題では、こういった Pop III 大質量星のうち $300 \sim 13500 M_{\odot}$ の質量をもつ 18 モデルにたいして、重力崩壊の計算を行ない、それに伴って放出されるニュートリノのルミノシティやエネルギー・スペクトルを系統的に解析した。初期モデルについては、等エントロピー的な平衡形状にある鉄コアを考え、エントロピーの値は Bond, Arnett & Carr (1984) により見積もられたものを用いた。また重力崩壊の計算においては、一般相対論的な重力崩壊とニュートリノ輸送をカップルさせて解くコードを用い、その際ニュートリノの分布関数は、各ニュートリノ species のエネルギー・角度分布を離散化して評価した。

その結果、このような星の重力崩壊においては、ニュートリノによる冷却が強く効いて、中心部に形成される内部コア（亜音速で崩壊する高密度な領域）が小さくなり、最初に形成されるブラックホールの大きさ（Apparent Horizon の位置）も小さくなることがわかった。またこれらの星では、内部コアの外側の外部コア（超音速で崩壊する低密度な領域）が幾何的に厚くなり、十数 MeV 程度の比較的高いエネルギーをもつニュートリノの Neutrino Sphere は外部コアの領域に存在することがわかった。結果として放出されるニュートリノの平均エネルギーは数 MeV 程度と低くなった。次に、質量依存性についてであるが、親星の質量が大きくなるほどニュートリノによる冷却の効果が強くなり、形成される内部コアやブラックホールの大きさは、親星の質量が数十倍になっても数倍程度しか変化しないことがわかった。また、親星の質量が大きくなるほど、放出されるニュートリノの全エネルギーも大きくなるが、ニュートリノの平均エネルギーは親星の質量にあまり依存しないこともわかった。これは、親星の質量が大きくてもニュートリノ冷却により内部コアは、質量の小さなモデルと比べてそれほど変わらず、また、親星の質量が大きなモデルほど、ニュートリノ源となる中心の内部コアの外側に外部コアが幾何的に厚く広がるため、高エネルギーのニュートリノが出てきにくい環境になっているからと考えられる。

さらに、この重力崩壊から放出されるニュートリノのスペクトルを、想定される IMF と星形成率に従って足しあげ、それらが現在の地球上でバックグラウンド (Relic Neutrino) としてどのように観測されるかを見積もった。計算は Λ CDM 宇宙論モデルに基づき、星形成率は宇宙全体のバリオンのうち 10% が Pop III star を形成すると仮定して規格化した。IMF は

$$\frac{dn}{dm} \propto m^{-\beta-1} \quad (m > 100 M_{\odot}, 1 < \beta < 3) \quad (1)$$

とし、星形成率の redshift 依存性については、(A) WMAP による宇宙の再イオン化の観測、(B) Scannapieco et al. (2002) による星形成の理論計算、(C) Murakami et al. (2005) による GRB 観測から見積もられた星形成率、の 3 つを仮定した。その結果、現在稼動しているニュートリノ検出器では、Relic Neutrino の測定は不可能だが、 ν_e については、Pop III が宇宙起源で最大の

源となるエネルギー領域があることがわかった。これより、方向分布まで測定できれば原理的には観測可能であると言える。また Relic Neutrino Flux のピークエネルギーは主に星形成のタイミングによって決まり、IMF にはあまり依存しないことも分かった。このため、Pop III による Relic Neutrino の観測が実現されれば、Pop III の星形成史にある程度の制限が与えられる可能性がある。